

УДК 539.3

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РОБОЧОЇ ДЕТАЛІ
З ОЗНАКАМИ МЕХАНІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ**

Кандидати техн. наук В. П. Раківненко, А. В. Колісник

**METHODOLOGY FOR DETERMINING THE LEVEL OF PERFORMANCE
OF A WORKING PART WITH SIGNS OF MECHANICAL DAMAGE**

PhD (Tech.) V. Rakivnenko, PhD (Tech.) A. Kolisnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320676>



Анотація. Практика свідчить, що наявність тріщини ще не означає втрату несучої здатності конструкції: до критичного розміру тріщини пошкодження може бути безпечним, якщо є можливість виявити і відслідкувати розвиток дефекту, що буде обґрунтуванням подальшої експлуатації високовартісного об'єкта. У статті розглянуто метод визначення рівня працездатності навантаженої деталі через аналітичне знаходження небезпечного його стану за допомогою коефіцієнтів інтенсивності напружень, які є чисельною характеристикою механічних пошкоджень. Ураховуючи складність розглянутої задачі, розв'язання проводимо методом енергетичного балансу.

Ключові слова: працездатність, механічні пошкодження, втомленість, енергетичний баланс, теорії міцності.

Abstract. The article discusses the urgent problem of the operability of a working part with signs of mechanical damage in the form of cracks, which negatively affects the performance of the object. Premature, sometimes sudden destruction occurs even when subjected to minor loads. The

purpose of the article is to analytically determine the critical state of a structural element in terms of its performance through stress intensity factors (SIF), which are a numerical characteristic of the material's crack resistance.

Cracks can be technological: they occur during casting, forging, welding, as well as acquired; during installation of the object or operation (from overload), The occurrence of cracks also depends on the type of load: static, alternating and dynamic; on the type of deformation: tension-compression, shear, torsion, bending, as well as on the physical and mechanical characteristics of the material and the geometry of the object.

Practice shows that the presence of a crack does not mean the loss of the bearing capacity of the structure: damage up to a critical crack size can be safe if it is possible to detect and track the development of the defect, which will justify the further operation of the valuable object.

Given the complexity of the problem under consideration, we solve it using the energy balance method. Its essence is as follows.

Elastic bodies accumulate mechanical energy potential during deformation. It cannot disappear without a trace, and in the presence of a crack, it is accumulated by the surfaces of its banks, or rather in the tension deformation of these banks, which leads to the development of a crack.

The critical state of crack resistance is determined by the ratio between the stress intensity coefficients (SIC), which reflect the size of the crack and the acting stresses. In this case, the structure will be inoperable, or such that the destruction process can be prolonged in time.

Key words: performance, mechanical damage, fatigue, energy balance, strength theory.

Вступ. Експлуатація багатьох відповідальних споруд і конструкцій, таких як мости, вежі, літальні апарати і багато інших об'єктів, свідчить про явища передчасного, іноді і раптового, їх руйнування навіть за дії незначних навантажень у результаті отримання робочими деталями механічних пошкоджень. Процес руйнування супроводжується зазвичай появою тріщин і, нерідко, з лавинним їх розростанням.

У поданій вище картині руйнування основною причиною є наявність первинних дефектів будови матеріалу: мікропори, мікротріщини, які зародилися задовго до повного руйнування матеріалу.

Тріщини можуть бути технологічними, що виникають у процесі лиття, кування, зварювання, а також такими, що виникли з монтажем об'єкта або експлуатацією (від перевантаження).

Вплив тріщини на працездатність деталі залежить від виду навантаження: статичне, знакозмінне і динамічне; типу деформації: розтяг-стиск, зсув, згин, кручення, а також фізико-механічних характеристик матеріалу і геометрії об'єкта.

Практика свідчить, що наявність тріщини ще не означає втрату несучої здатності конструкції: до критичного розміру тріщини пошкодження може бути безпечним, якщо є можливість виявляти і відслідковувати розвиток дефекту, що може бути обґрунтованим подальшої експлуатації високовартісного об'єкта, тим більше, що процес руйнування може бути пролонгованим у часі. Цей факт є особливо важливим, коли відбуваються бойові дії і боєздатність техніки та озброєння має бути прогнозованою. Тому фахівцям-практикам необхідно бути обізнаними в цих питаннях хоча б у межах методики, розглянутої в статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання прогнозування втомленої міцності матеріалів було і залишається актуальним протягом століття. У результаті досліджень, виконаних у галузі механіки руйнування, як закордонними вченими А. Гріффітсем, Г. Орованом, Дж. Ірвіним, так і вітчизняними С. В. Серенсенном, Б. Я. Кантором, Ю. І. Кудишиним, В. В. Панасюком, Е. М. Морозовим та іншими, механіка

руйнування досягла високого рівня розвитку і пропонує ґрунтовні методи розв’язання інженерних задач з розрахунку на міцність деталей із тріщинами.

Більшість дослідників із цього питання використовували відомі теорії міцності [2-4], недоліком яких є неспроможність повноцінно пояснити негативний вплив тріщини на зниження працездатності елементів конструкцій. Із запропонованих найбільш ефективним у вирішенні проблеми виявився енергетичний підхід (четверта теорія міцності), за яким на основі механіки пружного суцільного середовища молодим англійським аспірантом А. Гріффітсом у 1920 році була розроблена теорія руйнування крихкого матеріалу, що мав тріщину [1].

Метою статті є аналітичне визначення критичного стану елемента конструкції відносно його працездатності через коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН), які є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу.

Основна частина дослідження. Відомо, що пружні тіла в процесі деформації накопичують потенціал механічної енергії, якої вони прагнуть позбутися, за принципом мінімуму стабільного енергетичного поля.

Поверхня твердого тіла як об’єкт існування має силу поверхневого натягіння, внаслідок чого вона з деформацією акумулює реальну механічну енергію.

Для рідини цей ефект наочний, а для твердого тіла – не очевидний. Тверді тіла досить жорсткі відносно деформуваці зсуву, і тому їхня форма суттєво не зміниться під дією сил поверхневого натягіння.

Розглянемо сутність енергетичного підходу до питання тріщиностійкості матеріалу. Маємо тонку пластину постійної товщини δ в одновісному полі

розтягувальних напружень σ . Матеріал пластини крихкий, але підпорядковується закону Гука аж до моменту руйнування.

Припустимо виникнення в ній із будь-якої причини наскрізь гострокінцевої тріщини довжиною $2l$ і перпендикулярною до осі навантаження (рис. 1).

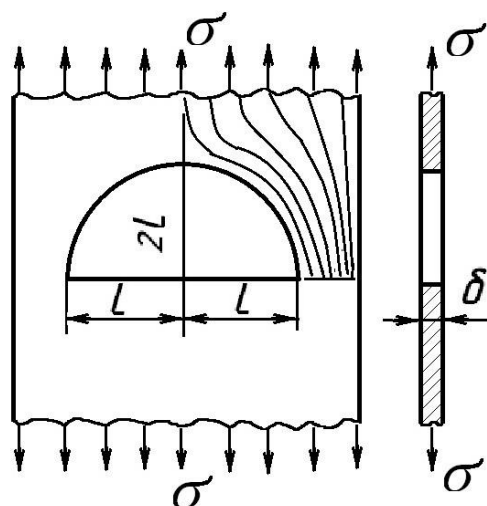


Рис. 1. Графічне зображення тріщини і силового поля

Береги тріщини як поверхні звичай звільнені від дії нормальних напружень σ . У силовому полі навколо тріщини виявилася зона розвантаження у вигляді еліпса з півосями l і $2l$, де напруження зменшуються до нуля [2]. Площа еліпса $S = \pi \cdot a \cdot b = 2 \cdot \pi \cdot l^2$, а об’єм зони розвантаження $V = S \cdot \delta = 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta$. Цей об’єм у пластині виявився вільним від пружної енергії за будь-якого σ .

За теоремою Клайперона, питома енергія деформації $u = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}$, де E – модуль Юнга. Тоді енергія, яка звільниться у зоні розвантаження, дорівнюватиме

$$U_{36} = u \cdot v = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta = \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta. \quad (1)$$

Ця енергія не може зникнути безслідно, тому в межах локального енергетичного балансу в зоні тріщини вона, природно, акумульована поверхнями берегів самої тріщини.

Частина акумульованої енергії витрачається на поверхневе натягнення берегів тріщини [3]:

$$U_{nn} = f \cdot \chi = 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi, \quad (2)$$

де $f = 4 \cdot l \cdot \delta$ – площа берегів тріщини;

χ – питома енергія натягнення поверхонь берегів.

Без урахування можливої дисипації енергії можна записати рівняння

$$U(l) = -U_{зв} + U_{nn} = -\pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta + 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi. \quad (3)$$

Оскільки перехід у критичний стан стійкого розвитку тріщини супроводжується мінімальним поглинанням

енергії, тому критичну довжину тріщини l_c знайдемо з мінімуму функціонала (3) за l :

$$\frac{\partial}{\partial l} U(l) = -2 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l \cdot \delta + 4 \cdot \delta \cdot \chi = 0,$$

звідки

$$l_c = \frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2}. \quad (4)$$

Критичній довжині тріщини l_c відповідає критичне значення напруження σ_c

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot l_c}}. \quad (5)$$

Отже, чим менше значення σ_c , тим більший критичний розмір l_c . За меншої початкової довжини тріщини l можуть бути реалізовані більші напруження σ_c без зростання самої тріщини. Саме з цієї причини реальні матеріали мають певний

запас міцності, незважаючи на наявність у них тріщин та інших дефектів (рис. 2) [4].

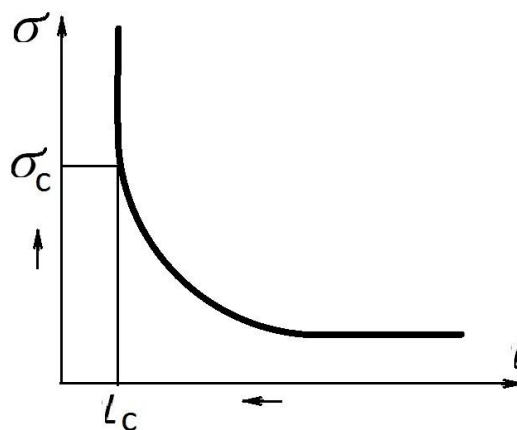


Рис. 2. Залежність міцності матеріалу від довжини тріщини

З вище наведеного випливає, що задача тріщиностійкості має складне аналітичне розв'язання внаслідок

складності визначення параметра χ , який відомий для конструкційних матеріалів лише на рівні порядку їхніх величин [5].

Слід урахувати той факт, що конструкційні матеріали в критичному стані деформування переважно набувають пластичних властивостей ($\sigma_{np} < \sigma_c \leq \sigma_T$) у зонах концентрації напружень – на кінцях тріщини.

Хоча теорія А. Гріффітса стосується лише крихких матеріалів, але американський учений Е. Орован [6] у 1950 році запропонував урахувати пластичну роботу поверхней тріщини в рамках теорії А. Гріффітса, надавши поверхневій енергії χ ширшого змісту і подавши її як суму

$$\chi = \chi_{кр} + \chi_{нл}, \quad (6)$$

де $\chi_{кр}$ – питома енергія крихкої фази деформації;

$\chi_{нл}$ – питома енергія пластичної фази деформації.

Саме в цьому і полягає концепція квазікрихкості критичного стану деформованого тіла. Вона відображує реальну поведінку матеріалів.

Експериментально встановлено [6], що пластична деформація поверхневого шару тіла $\chi_{нл}$ на три порядки перевищує величину $\chi_{кр}$. Тому останньою можна знехтувати і формулу (5) записати як

$$\chi = \chi_{нл}. \quad (7)$$

Рівняння (4) можна ще записати в еквівалентній йому формі [7], поділивши параметри за категоріями через коефіцієнт інтенсивності напружень K (KIH):

$$\sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}$$

або

$$K = \sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq K_c = \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}. \quad (8)$$

Коефіцієнт K (ліва частина рівняння (8)) відображує «силовий критерій» критичного стану – геометричний (розмір тріщини l) і механічний фактори (напруження σ).

Щодо правої частини рівняння (8), то коефіцієнт K_c пов'язаний із «в'язким руйнуванням»; він є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу.

Відомо, що в'язкість властива складному, неоднорідному матеріалу, який гальмує розвиток тріщини; тоді як однорідний матеріал, будучи крихким, є менш тріщиностійким [8].

Умова (8) – достатньо надійний критерій оцінювання тріщиностійкості матеріалу, оскільки загроза появи критичного стану деталі з тріщиною описана інтенсивністю поля напружень σ у вершинах тріщини, а початок швидкого розвитку тріщини визначений умовою $K \geq K_c$.

Висновки. Наявність ефективних методів визначення величин K_c із наданням їм унормованого статусу для різних матеріалів і умов навантаження можна вважати передумовою для розрахунку конструкцій на тріщиностійкість у межах KIH у порядку задоволення нерівності (8) із знанням властивостей матеріалу елемента конструкції, його геометрії та виду навантаження.

Запропонований метод дає змогу через співвідношення коефіцієнтів напруження за наявності тріщини визнати конструкцію або непрацездатною, або такою, що процес руйнування її може бути пролонгованим у часі. Останнє посилення означає екстремальні умови застосування техніки, наприклад бойові дії, коли пролонгування працездатності пошкодженого об'єкта може бути вирішальним у досягненні успіху.

Оскільки це посилання не набуло ще достатньої уваги науковців, у подальшому

воно може бути темою ґрунтовного дослідження.

Список використаних джерел

1. Griffith A. A. The phenomener of rupture and flow in solids, Phil. Trans Roy Soc. A 221. 1920. P. 163-168. URL: <https://mbarkey.eng.ua.edu/courses/AEM644/Griffith1921fracture.pdf>.
2. Долгов О. М. Механіка руйнування: підручник / Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 166 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/288815547.pdf>.
3. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наукова думка, 1968. 246 с.
4. Панасюк В. В. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. Киев: Наукова думка, 1991. 172 с.
5. Irwin G/R/ Fracture dynamics. «Fracture of Metals», ASM, Cleveland, 1948. P. 149-166.
6. Кантор В. Я., Стрельникова Е. А. Гіперсингулярні рівняння в задачах механіки суцільного середовища. Харків: Нове слово, 2005. 252 с.
7. Orowan E. O. Fundamental of erittle behavior of metals. «Fatigue and Factice of Metals». Wiley. New York, 1950. P. 139-167.
8. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. Живучесть конструкций в аварийных состояниях. *Металлические здания*. 2008. № 5. С. 21-23.

Раківненко Валерія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. [https:// orcid. org/ 0000-0002-6136-6191](https://orcid.org/0000-0002-6136-6191).
E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. <https://orcid.org/0000-0001-5038-0230>. Тел.: 0662331644.
E-mail: allinchi26@gmail.com.

Rakivnenko Valeriya PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20.

E-mail kolisnuk@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 13.12.2024 р.